

# 江南造山带西北缘多金属脉型铅锌矿床分散元素铟、镓、镉的富集规律研究

周正兵 温汉捷\*

中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550081

## 1. 引言

以铅、锌、铜硫化物为主要矿物的多金属脉型矿床星罗棋布地分布在江南造山带西北缘板溪群地层之中。最近研究表明：其成矿过程与深部岩浆热液作用关系十分紧密 (Zhou et al., 2017)，且此类矿床显著富集铟 (In)、镓 (Ga) 及镉 (Cd) 元素。In、Ga 和 Cd 在现代工业中的作用越发重要，厘清此类矿床中 In、Ga 和 Cd 的富集规律对于高效开发利用此类矿床提供理论依据；结合其特殊的地球化学性质，可以更清楚地认识此类矿床的成矿机理。

本文对此类矿床中围岩、蚀变围岩、矿石及硫化物的元素含量进行测试，结合其矿物学特征，对 In、Ga 和 Cd 在矿床中的富集规律进行探究，并进一步约束其成矿机理。

## 2. 地质背景及矿床地质特征

江南造山带位于扬子板块与华夏板块之间，自晋宁期以来经历了晋宁运动、广西运动等多次造山作用而形成；其主要岩性组成为中-新元古界巨厚、成熟度较高的变沉积岩系和花岗岩侵入体。在江南造山带西北缘，以铅、锌、铜硫化物为主要矿物的多金属脉型矿床赋存于新元古界下江群之中，围岩岩性为灰色、深灰色中厚层变余凝灰岩、凝灰质板岩、凝灰质变余砂岩、粉砂绢云母板岩、变余砂岩及变余粉砂岩。区内大型的断裂构造控制了多金属脉型矿床的分布，矿化特征表现为脉状矿体充填在正断层之中。

矿石矿物以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿及黄铜矿为主，部分矿段见微量斑铜矿；脉石矿物以石英为主导，含少量白云石等碳酸盐矿物，随着脉体侵位位置升高，白云石的含量有明显升高的趋势。围岩蚀变以硅化最为常见，同时矿化过程中伴随着对围岩强烈的角砾化现象。

现在开采中的矿床包括平门、崩冲、老都、杨家湾、南笋、排望以及松柏洞矿床。样品采自这些矿床的采矿坑道内，并对同一矿床不同标高的矿石进行仔细采样，观察矿化在同一矿床内及区域上的变化规律。

## 3. In-Ga-Cd 的富集规律

### (1) In 的富集规律

未蚀变围岩中 In 的含量的平均值为 0.07 ppm，与 In 在地壳中的丰度含量相当；蚀变围岩中 In 的含量为 1.64~36.00 ppm (均值 12.89 ppm)，可见 In 在矿石中发生了明显富集。蚀变围岩中 1000In/Zn 比值平均值为 0.13，表明 In 并不是单一赋存在闪锌矿中，应该存在其它富 In 矿物。

硫化物中铟的含量分别为：闪锌矿中为 8.07~189.50 ppm (均值 36.60 ppm)，In 与 Sn 相关性较好，相关系数为 0.85；黄铜矿中为 37.0~88.43 ppm (均值 64.21 ppm)；黄铁矿及方铅矿中含量较低，大部分低于 In 的检测限 (0.005 ppm)，部分方铅矿中 In 的含量可达数 ppm，但含量变化较大，扫描电镜观察发现方铅矿常被闪锌矿和黄铜矿交代或方铅矿颗粒之间为这些硫化物的细小包裹体充填，表明方铅矿中的 In 实际上应该源自闪锌矿及黄铜矿所赋存的 In。因此该矿床中 In 主要赋存于闪锌矿及黄铜矿中。

热液演化晚阶段较早阶段沉淀的硫化物要富 In。在金堡矿区，相距不远的平门、崩冲和老堡矿床中，老堡矿床中的闪锌矿的 In 含量明显高于其它两个矿床中闪锌矿 In 的含量。这对应老堡矿床的热

液侵位位置相对高于平门及崩冲矿床，老堡矿床的围岩为平略组，而平门及崩冲矿床的围岩为平略组下伏的清水江组；此外，晚阶段沉淀的闪锌矿，尤其是与黄铜矿共生的闪锌矿比早阶段棕黑色闪锌矿中 In 含量要高，这与 In 主要与 Cu 一起替代 Zn 进入闪锌矿晶格有关，其替代方式为： $Cu^{+} + In^{3+} \leftrightarrow Zn^{2+}$  (Cook et al., 2009)。

#### (2) Ga 的富集规律

未蚀变围岩中 Ga 的含量的平均值为 16.00 ppm，几乎等同于 Ga 在地壳中的丰度；蚀变围岩中 In 的含量为 13.5~124.50 ppm (均值 45.88 ppm)，表现出成矿流体中富集 Ga。硫化物中，Ga 主要富集在闪锌矿中，闪锌矿中 Ga 含量为 74.25~366.45 ppm (均值 192.51ppm)；黄铁矿、黄铜矿和方铅矿中 Ga 含量极低。

镓与 Zn 的相关性最好，相关系数为 0.44。闪锌矿从早阶段到晚阶段，Ga 的含量降低；Ga 与 Cu 呈弱负相关关系，表明 Ga 替代进入闪锌矿晶格的方式与 In 不同，其可能为以  $Ga_2S_3$  的形式替代进入闪锌矿之中。

#### (3) Cd 的富集规律

未蚀变围岩中 Cd 的含量的平均值为 0.16 ppm，略高于 Cd 在地壳中的丰度；蚀变围岩中 Cd 的含量为 96.00~567 ppm (均值 278.73 ppm)，体现出成矿流体富 Cd。闪锌矿中 Cd 的含量远远高于其它硫化物中 Cd 的含量。闪锌矿中 Cd 含量在 864.30~3275.00 ppm 之间 (均值为 1847.54 ppm)，而黄铜矿、黄铁矿及方铅矿中仅仅含少量 Cd (几个 ppm)。

闪锌矿中 Zn/Cd 比值为 188~557 (均值 372)，与岩浆热液型的闪锌矿中 Zn/Cd 比值变化范围十分一致 (Wen et al., 2016)，表明其成矿流体为岩浆热液流体；结合其 Cd 同位素组成与岩浆热液十分相似的特点，进一步印证了 Zhou et al. (2017) 提出岩浆热液是形成此类矿床的主要成矿流体的判断。

#### (4) In-Ga-Cd 对成矿流体的指示意义

围岩地层中 In、Ga 及 Cd 的含量很低，与地壳的丰度相差无几，表明围岩不可能是此类矿床的成矿金属物质来源，这与矿石及围岩在 Pb 同位素上存在明显差异相一致 (Zhou et al., 2017)；Zn/Cd 比值与岩浆热液相似也证明其成矿流体主要源自岩浆热液。无论是早阶段还是晚阶段的闪锌矿中 Mn 的含量都较高，对应其成矿环境为还原环境 (Kelley et al., 2004)。在聚类分析中，Co、Ni、Mn、Sn、Cu、In 及 Se 表现出紧密的相关性，对应的另一聚类为 Ga、Zn、Cd、Hg、Fe 及 Pb。Co、Ni、Mn、Sn、Cu、In 及 Se 恰好对应晚阶段矿石中闪锌矿、黄铜矿及方铅矿等矿物交代早阶段矿物或者在热液侵位末端富集成矿的矿物学特征。表明成矿流体在演化中逐渐富集 Co、Ni、Mn、Sn、Cu、In 及 Se 元素。

## 4. 结论

江南造山带西北缘板溪群地层所赋存的多金属脉型矿床中 In 主要富集在闪锌矿和黄铜矿之中，且在成矿晚阶段 In 更为富集；Ga 主要富集在闪锌矿中，随着成矿的进行，成矿流体中 Ga 含量逐渐降低；Cd 主要赋存于闪锌矿中，Zn/Cd 比值表明其成矿物质与岩浆热液联系较为紧密。在矿化过程中，Co、Ni、Mn、Sn、Cu、In 及 Se 在晚阶段富集，对应晚阶段闪锌矿中 In 含量升高；Ga 与 In 恰好相反，倾向于在早阶段结晶的闪锌矿中富集，表明成矿物理化学环境的变化对 Ga 及 In 替代进入闪锌矿中的难易程度有明显控制作用。

本研究由科技部“973”项目 (编号：2014CB440904)、国家自然科学基金项目 (40930425, 41173026) 资助。

## 参考文献

Cook NJ et al., Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73, 4761 - 4791

Kelley KD et al., Textural, Compositional, and Sulfur Isotope Variations of Sulfide Minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag Deposits, Brooks Range, Alaska: Implications for Ore Formation, *Economic Geology*, 2004, 99, 1509-1532

Wen HJ et al., Zn/Cd ratios and cadmium isotope evidence for the classification of lead-zinc deposits, *Scientific Reports*, 2016, 6, 25273

Zhou ZB et al., Geochemical and isotopic evidence for a magmatic-hydrothermal origin of the polymetallic vein-type Zn-Pb deposits in the northwest margin of Jiangnan Orogen, South China, *Ore Geology Reviews*, 2017, 86, 673-691